

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Nina Pletikosić

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Nina Pletikosić

**Metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona prema Nan Su, Kung-
Chung Hsu i His-Wen Chai-u**

Završni rad

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

**STUDIJ: PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
 GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Nina Pletikosić

BROJ INDEKSA: 3987

KATEDRA: Katedra za građevinske materijale

PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona prema Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai-u.

Opis zadatka: Potrebno je prikazati metodu proračuna samozbijajućeg betona koju su razvili Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai. Prema predloženoj metodi napraviti 3 mješavine samozbijajućeg betona te ih ispitati u svježem i očvrsлом stanju.

U Splitu, 03.09.2015.

Voditelj završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona prema Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai-u

Sažetak:

Samozbijajući beton može ispuniti svako mjesto i svaki kut u oplati samo pod djelovanjem vlastite težine i bez potrebe za vibriranjem. Kako bi se postiglo svojstvo samozbijanja, pasta, mort i beton u cjelini moraju biti stabilni i konzistencije unutar određenih granica. Beton se mora lako preoblikovati, a da pri tome ne dolazi do segregacija na bilo kojem nivou veličine zrna. Visoka trajnost postiže se izborom niskog vodovezivnog faktora, što je moguće jedino upotrebom superplastifikatora. U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su 3 različite vrste betonskih mješavina. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona projektiranog prema metodi jednostavnog projektiranja sastava u svježem i očvrslom stanju.

Ključne riječi:

Samozbijajući beton, leteći pepeo, silikatna prašina, projektiranje sastava, postupci ispitivanja.

(A simple mix design method for self-compacting concrete;

Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai)

Abstract:

Self-compacting concrete can fill every place and every corner of the formwork only under their own weight and without the need for vibration. To achieve characteristic compaction, paste, mortar and concrete as a whole must be stable and consistency within certain limits. Concrete can be easily reformatting, and that doing so there is no segregation at all levels of grain size. High durability is achieved by selecting low Water–cement ratio factor, which is only possible using the superplasticizer. In the experimental part of the work are made 3 different types of concrete mixture. Presents and analyzes the results of self-compacting concrete designed according to the simple mix design method in fresh and hardened state.

Keywords:

Self-compacting concrete, fly ash, silica fume, mix design, testing procedures.

SADRŽAJ

1. SAMOZBIJAJUĆI BETON	2
1.1. Razvoj samozbijajućeg betona	2
1.2. Sastav samozbijajućeg betona	3
1.3. Svojstva.....	4
1.4. Primjena samozbijajućeg betona	5
2. METODA JEDNOSTAVNOG PROJEKTIRANJA SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA	6
2. 1. Postupak projektiranja mješavine predloženom metodom.....	7
2.2. Učinak faktora pakiranja agregata na tlačnu čvrstoću	13
2.3. Učinak faktora pakiranja na tečenje i sposobnost prolaza SCC-a	14
2.4. Utjecaj faktora pakiranja na visinu izdizanja betona kod U testa i volumen paste u SCC-u.	15
2.5. Odnosi.....	15
2.5. Sastav mješavina za SCC po volumenu($0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$)	17
2.6. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	19
3.1. Uvod	19
3.2. Materijali	19
3.2.1. Cement	20
3.2.2. Agregat	21
3.2.3. Dodaci betonu	22
3.3. Proračun sastava betona	25
3.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama	27
3.4.1. V-lijevak (V-funnel)	27
3.4.2. Metoda razastiranja (Slump-flow).....	29
3.4.3. L-box test	32
3.4.2. J-ring	35
3.4.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona.....	38
3.4.4. Ispitivanje ultrazvukom	41
ZAKLJUČAK.....	44
POPIS LITERATURE.....	46

1. SAMOZBIJAJUĆI BETON

Samozbijajući beton predstavlja golemi napredak u tehnologiji betonske industrije. Zahvaljujući svojim svojstvima značajno je pridonio povećanju kvalitete betonskih konstrukcija, a ujedno je omogućio primjenu betona u području građevinarstva za koje su se do tada koristili drugi materijali. Ovakav tip betona teče samo pod utjecajem vlastite težine, bez segregacije i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez upotrebe vibracijskih uređaja. [1]

Faktor koji najviše koči veću primjenu ovog tipa betona je činjenica da ne postoje norme za samozbijajuće betone. Za primjenu samozbijajućih betona velik je napredak napravljen donošenjem Europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju [2]

Termin samozbijajući beton u stranoj literaturi možemo pronaći pod različitim imenima, "self compacting concrete", "self consolidating concrete", "vibration free concrete", čime se opisuje glavna karakteristika ovog betona, a to je da za njegovo zbijanje nije potrebno vibriranje dok je u svježem stanju, već se to postiže pravilnim projektiranjem sastava. [1]

1.1. Razvoj samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton razvijen u Japanu u kasnim 1980-ima, zbog uočenih problema trajnosti armiranobetonskih konstrukcija.

Rješenje je ponudio profesor Okamura sa Sveučilišta u Tokiju 1988. godine. Ponudio je prvi prototip samozbijajućeg betona koristeći materijale koji su već bili dostupni na tržištu.

Svojstva tog betona bila su definirana kao:

- u svježem stanju mora imati svojstvo samozbijanja;
- u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata;

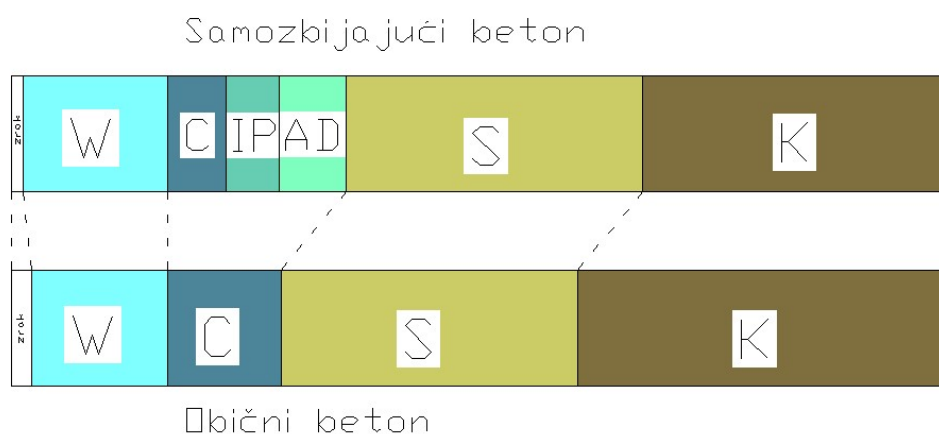
- u očvrslom stanju mora biti otporan na vanjske utjecaje. [3]

Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi. Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja. [4]

1.2. Sastav samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton se sastoji od istih materijala koji se koriste za proizvodnju običnog betona (cement, agregata voda, aditivi), ali postoji vrlo bitna razlika između sastava tih dviju vrsta.

Samozbijajući beton ima manji udio zraka i krupnog agregata u usporedbi s običnim betonom, dok je udio sitnog agregata jednak. Uz cement, samozbijajući beton sadrži još inertna punila i aktivne dodatke što zajedno čini vezivo.



Slika 1.1. Usporedba sastava običnog betona i samozbijajućeg betona[5]

1.3. Svojstva

Svježi samozbijajući beton mora imati ista osnovna svojstva kao i beton za pumpanje. To znači da se mora lako preoblikovati, a da pri tome ne dolazi do segregacije na bilo kojem nivou veličine zrna.

Prvi zahtjev je da pasta mora imati visoku sposobnost tečenja, ali istodobno mora biti stabilna. Poznato je da se taj zahtjev može ispuniti upotrebom veziva s visokim sadržajem najsitnijih čestica. Za postizavanje visoke sposobnosti tečenja i istodobno stabilnosti, pasti se dodaju čestice sitnije od cementa. U tu svrhu najbolji je elektrofilterski SiO_2 prah koji ima prosječnu veličinu čestica od nekoliko mikrometara.

Drugi zahtjev je da mort sam za sebe mora također biti stabilan. Taj zahtjev se ispunjava upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1 mm, čime se sprječava segregacija između morta i paste.

Treći zahtjev je da beton kao cjelina mora biti stabilan i konzistencije unutar određenih granica. U pogledu sadržaja krupnog agregata nema posebnih ograničenja.

Visoka trajnost postiže se izborom niskog vodovezivnog faktora, što je moguće jedino upotrebom superplastifikatora. [5]

Dakle osnovni zahtjevi za samozbijajući beton su:

- Razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1)
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava
 - Maksimalni vodocementni omjer
 - Minimalna količina cementa
- Najveća veličina zrna agregata D_{\max}

Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton su:

- Vrijednost T_{500} (raspostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
- Ispitivanje L kutijom
- Otpornost segregaciji

- Temperatura svježeg betona, ako se razlikuje od HRN EN 206-1. [4]

1.4. Primjena samozbijajućeg betona

Korištenje samozbijajućeg betona ima prednosti:

- skraćanje trajanja gradnje
- osiguranje dobrog zbijanja u cijeloj konstrukciji, posebno na mjestima suženja gdje je primjena vibratora otežana
- eliminacija buke koju proizvode vibratori.
- produžuje vijek trajanja oplata

Upotrebom samozbijajućeg betona mogu se izvoditi novi oblici betonskih konstrukcija s gustom armaturom i više drugih prepreka u njima. Posebno efikasna može biti primjena u sendvič-konstrukcijama, kada se na postojeću konstrukciju dodaje sloj novoga betona radi povećanja nosivosti ili zamjene dotrajalog vanjskog sloja.

Međutim, unatoč svim prednostima i uštedama, ukupna cijena gradnje samozbijajućim betonom uglavnom nije smanjena. Smanjenje cijene za sada je dokazano samo pri dobro organiziranoj proizvodnji velike količine betona koja se proizvodi na centralnom pogonu. [5]

2. METODA JEDNOSTAVNOG PROJEKTIRANJA SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

Količina agregata, veziva, vode za miješanje, kao i tip i doziranje superplastifikatora najviše utječu na svojstva samozbijajućeg betona. Provedeni testovi u svježem i očvrsлом stanju prema predloženoj metodi pokazali su da ova metoda može proizvesti samozbijajući beton velike kvalitete.

U usporedbi s metodom Japanese Ready-Mixed Concrete Association (JRMCA) nova metoda jednostavnog projektiranja sastava samozbijajućeg betona je:

- jednostavnija,
- lakša za izvršiti,
- zahtjeva manje vremena,
- zahtjeva manji iznos veziva
- manje košta.

HPC koji je razvijen u Sjevernoj Americi i Europi ne može teći sam kako bi popunio svaki rub kalupa i sve praznine među armaturom stoga zahtjeva vibraciju i zbijanje u procesu ugradnje. Usporedno, SCC ima povoljnije karakteristike kao što je visoka tečnost, otpornost prema segregaciji i mogućnost samozbijanja bez ikakve potrebe za vibriranjem. S tim dobrim osobinama, SCC može uvelike poboljšati pouzdanost i trajnost armiranobetonskih konstrukcija .

“Standardna metoda kombiniranog SCC-a“ predložena od JRMCA (Japansko društvo građevinara) je pojednostavljena verzija Okamura metode. Ova metoda može biti upotrijebljena za proizvodnju SCC-a s velikim udjelom materijala u prahu i vodom i vezivom u omjeru $<0,30$.

Okamura metoda:

- cilj je provest ispitivanje na pasti i mortu kako bi ispitali svojstva i kompatibilnost superplasifikatora, betona, sitnog agregata i pucolanskih materijala.
- glavna prednost ove metode je da se time izbjegava ponavljanje iste vrste kontrole kvalitete na betonu, što štedi i vrijeme i rad.
- nedostatak Okamura metode je taj da zahtjeva kontrolu kvalitete paste i morta za miješanje SCC-a koja je zahtjevnija za praktično izvršenje pa mnogi proizvođači betona nemaju potrebne sposobnosti za provođenje takvih testova.

Skupina Hon iz kontinentalne Kine nije otkrila svoje postupke projektiranja sastava mješavine, međutim ponudila je neka korisna načela. Skupina je pokazala da prenizak volumen paste ne samo da narušava sposobnost prolaska betona, nego također smanjuje svoju sposobnost samozbijanja u slučaju da se ne koriste vibracije u procesu miješanja.

2. 1. Postupak projektiranja mješavine predloženom metodom

Osnovni cilj razmatranja predložene metode je popuniti pastom šupljine među zrnima agregata koja su u nasutom stanju. Omjer volumena agregata je oko 52-58%, što znači da je 42-48% šupljina u nasutom agregatu prema ASTM C29. Prema predloženoj metodi sve što treba napraviti je odabrati kvalificirane materijale, izvršiti izračun, provesti odgovarajuće testove, učiniti neke prilagodbe. Kada se sve to napravi, može se uspješno napraviti SCC s dobrom protočnošću, otpornosti prema segregaciji i sposobnošću samozbijanja.

- Prvi korak je izračun sadržaja krupnog i sitnog agregata

Kada su površinski suhi krupni i sitni agregati zajedno slobodno nasuti, između njih postoje praznine i trenje. Dodavanjem vode i veziva agregatima, dolazi do ramicanja agregatnog skeleta. Omjer volumena agregata poslije podmazivanja i zbijanja u SCC-u je oko 59-68%. Predložena metoda definira faktor pakiranja agregata PF kao omjer mase agregata u

zbijenom stanju u SCC i mase agregata u rastresitom stanju. Faktor pakiranja utječe na sadržaj krupnog i sitnog agregata u SCC-u. Viša vrijednost faktora pakiranja bi značila veći sadržaj krupnog i sitnog agregata, a manji sadržaj veziva u SCC-u. Važno je odrediti optimalnu vrijednost faktora pakiranja pri projektiranju mješavine kako bi postigli željena svojstva SCC-a, vodeći računa i o ekonomskoj isplativosti. Veći sadržaj agregata znači slabiju fluidnost, slabiju mogućnost samozbijanja i manju tlačnu čvrstoću. Niska vrijednost faktora pakiranja znači veći sadržaj veziva samim time i veće skupljane betona sušenjem. Veći sadržaj veziva znači bolju obradivost i trajnost SCC-a, ali se povećavaju troškovi materijala.

Sadržaj krupnog i sitnog agregata računa se prema formulama:

$$W_g = PF \cdot W_{gl} \left(1 - \frac{S}{a} \right)$$

$$W_s = PF \cdot W_{sl} \cdot \frac{S}{a}$$

Gdje je:

W_g : sadržaj krupnog agregata u SCC (kg/m^3).

W_s : sadržaj sitnog agregata u SCC (kg/m^3).

W_{gt} : volumna jedinica mase rastresitog, zasićenog, površinski suhog krupnog agregata na zraku.

W_{sL} : volumna jedinica mase rastresitog, zasićenog, površinski suhog sitnog agregata na zraku.

PH: faktor pakiranja, omjer mase agregata u zbijenom stanju u SCC i rastresitom stanju na zraku.

S/a: omjer volumena sitnog agregata i ukupnog agregata je u rasponu od 50-57%.

Japansko društvo arhitekata određuje tri kategorije maksimalne veličine agregata: 15, 20 i 25 mm. Najčešće korištena veličina je 20 mm. Još je preporučeno da sadržaj krupnog agregata mora biti oko 50% suhe pakirane jedinice težine (JIS A1104, ASTM C29).

- Drugi korak je izračun sadržaja cementa

Sadržaj veziva ne bi smio biti previše nizak da se osigura fluidnost i otpornost prema segregaciji. Preporuka priručnika za konstrukciju betona visoke fluidnosti je da minimalni iznos cementa treba biti 270 i 290 kg/m³ za proizvodnju normalnog betona visoke trajnosti. SCC promatran u ovom istraživanju pruža tlačnu čvrstoću od 20 psi (0,14 MPa)/kg cementa. Sadržaj cementa prema tome iznosi: $C = f_c / 20$ gdje je: C sadržaj cementa, f_c tlačna čvrstoća (psi).

- Treći korak je izračun sadržaja vode potrebne za cement

Veza između tlačne čvrstoće i omjera vode/cementa slična je kao i kod normalnog betona. Omjer vode/cementa može se odrediti prema AC 318 ili nekim drugim metodama. Sadržaj vode za mješavinu koju traži cement dobivamo: $W_{wc} = (W/C)C$ gdje je:

W_{wc} : sadržaj vode u mješavini koju traži cement (kg/m³)

W/C : omjer vode/cementa od težine koja može biti određena tlačnom čvrstoćom

- Četvrti korak izračun sadržaja letećeg pepela (FA) i zgure (GGBS)

Predložena metoda projektiranja mješavine koristi prikladan sadržaj cementa i omjera vode/cementa kako bi ispunila potrebnu tlačnu čvrstoću betona. Višak cementa povećava troškove materijala, skupljanje sušenjem, gubitak rasprostiranja postaje sve veći i tlačna čvrstoća betona je veća od zahtijevane. Kako bi povećali sadržaj veziva, a time povećali fluidnost, olakšali samozbijanje i poboljšali otpornost prema segregaciji mješavini se dodaju leteći pepeo i zgura. Volumen paste letećeg pepela (V_{Pf}) i volumen zgure (V_{PB}) izračunavaju se:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \cdot G_g} - \frac{W_s}{1000 \cdot G_s} - \frac{C}{1000 \cdot G_c} - \frac{W_{wc}}{1000 \cdot G_w} - V_a$$

Gdje je:

G_g : specifična težina krupnih agregata

G_s : specifična težina sitnih agregata

G_c : specifična težina cementa

G_w : specifična težina vode

V_a : sadržaj zraka u SCC-u (%)

Ukupan iznos pucolanskih materijala (letećeg pepela i zgure): W_{pm} (kg/m³)

Omjer tih dvaju materijala može se odrediti prema svojstvima lokalnih materijala i prijašnjim iskustvima. Postotak letećeg pepela označen je sa A% , a zgure sa B% od težine.

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \cdot A\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \cdot B\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_B}$$

G_f , G_B , G_C , W/F i W/S : mogu biti dobiveni iz testova

W_f : sadržaj letećeg pepela u SCC-u (kg/m³) i W_B : sadržaj zgure u SCC-u (kg/m³) može biti izračunat:

$$W_f = A\% \cdot W_{pm}$$

$$W_B = B\% \cdot W_{pm}$$

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu letećeg pepela:

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \cdot W_f$$

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu zgure:

$$W_{wB} = \left(\frac{W}{S}\right) \cdot W_B$$

- Peti korak izračun sadržaja vode u mješavini potrebne za SCC:

$$W_w = W_{wc} + W_{wf} + W_{wB}$$

Prema Japanskom društvu Arhitekata preporučeni sadržaj vode je: $W_w = 160-185 \text{ kg/m}^3$

- Šesti korak je doziranje superplastifikatora (SP)

Dodavanjem primjerene doze SP-a može se povećati fluidnost, mogućnost samozbijanja i otpornost prema segregaciji svježeg SCC-a. Sadržaj vode SP-a može biti smatran djelom vode za miješanje. Ako je doziranje SP-a jednako $n\%$ količine veziva i njegov čvrst sadržaj je $m\%$, tada doziranje može biti izračunato:

$$\text{Doziranje SP-a: } W_{sp} = n\% (C + W_f + W_b)$$

$$\text{Sadržaj vode u SP-u: } W_{wSP} = (1 - m\%) W_{SP}$$

- Sedmi korak je podešavanje sadržaja vode u mješavini za SCC

Prema sadržaju vlage agregata na betonari ili gradilištu stvarna količina vode koja se koristi za miješanje mora biti podešena.

- Osmi korak je pripremiti probnu mješavinu i provesti testove za svojstva SCC-a

Probna mješavina se napravi koristeći sadržaj prethodno izračunatih materijala. Testovi kontrole kvalitete SCC-a moraju se provesti da osiguraju sljedeće zahtjeve:

- 1) rezultati od rasprostiranja slijeganjem, U kutije, L kutije i V lijevka moraju biti u skladu s specifikacijama JAS,
- 2) segregacija agregata mora biti zadovoljavajuća,
- 3) omjer vode/veziva mora zadovoljavati zahtjeve trajnosti i čvrstoće,
- 4) sadržaj zraka mora biti u skladu s zahtjevima projekta mješavine.

- Deveti korak je podešavanje omjera mješavine

Ako provedeni testovi svježeg betona ne zadovoljavaju zahtjeve projekta moraju se izvršiti određena podešavanja. Na primjer, kada svježi beton pokazuje lošu fluidnost, smanjuje se vrijednost faktora pakiranja i povećava udio veziva tako poboljšavajući obradivost.

Sastavi mješavina izračunati koristeći ovu metodu:

Assume $PF = 1.18$.

Table 2
Mix proportion of SCC (kg/m^3)

$f'c$ (MPa)	Coarse aggregates	Fine aggregates	Cement	FA ^a	GGBS ^b	Water	SP ^c
27.5	743	961	200	157	67	176	7.6
34.3	731	945	250	154	66	173	8.5
41.2	718	928	300	148	63	172	8.2
48.0	706	912	350	142	61	170	8.8

^a FA: fly ash.

^b GGBS: ground granular blast-furnace slag.

^c SP: superplasticizer.

Sastav i fizikalna svojstva korištenih veziva:

Composition and physical properties of binders

Binders	SiO ₂ ^a	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	LOI ^b	SSA (m^2/kg) ^c	SG ^d
Cement	20.49	6.57	3.27	62.40	1.91	1.57	305.4	3.14
FA	55.5	27.9	6.3	6.27	1.6	5.01	(86.95% <45 μm)	2.15
GGBS	34.81	13.63	0.32	40.51	6.96	0.40	422	2.92

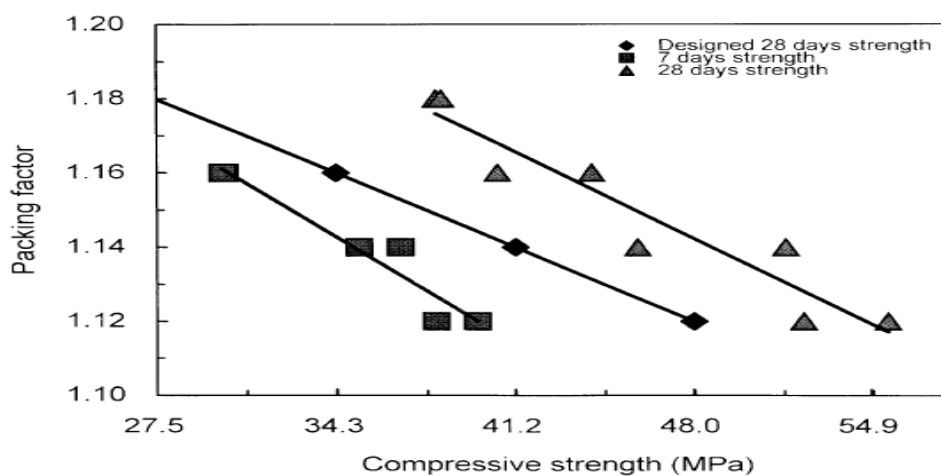
^a Percent by weight.

^b LOI: loss on ignition.

^c SSA: specific surface area.

^d SG: specific gravity.

2.2. Učinak faktora pakiranja agregata na tlačnu čvrstoću



Dijagram 2.1. Učinak faktora pakiranja agregata na tlačnu čvrstoću. [6]

Dijagram pokazuje da se povećanjem vrijednosti faktora pakiranja agregata (PF) smanjuje tlačna čvrstoća SCC-a. Samozbijajući betoni napravljeni po predloženoj metodi nakon njege od 7 dana pokazuju od 81% do 90% tlačne čvrstoće. Nakon 28 dana postignuta je tlačna čvrstoća koja je bila od 6.1MPa do 10.7MPa veća od zahtijevane u projektu.

Predloženom metodom projektiranja samozbijajućeg betona može se napraviti beton koji zadovoljava zahtijevanu tlačnu čvrstoću. Pošto je vrijednost faktora pakiranja agregata u velikoj mjeri povezana s tlačnom čvrstoćom, prilagodba faktora pakiranja agregata na 1.18, 1.16, 1.14 i 1.12 daje SCC koji može zadovoljiti zahtjeve tlačne čvrstoće od 27.5, 34.3, 41.2 i 48 MPa.

2.3. Učinak faktora pakiranja na tečenje i sposobnost prolaza SCC-a

1804

N. Su et al. / Cement and Concrete Research 31 (2001) 1799–1807

Table 5

Effect of packing factor on flowability and passing ability of SCC

Packing factor	Binders volume (1/1000 m ³)	Slump flow (cm × cm)	L-flow test (cm)	V-funnel flow time (s)	Segregation resistance
1.12	198	71 × 72	74	14	Excellent
1.14	186	70 × 71	72	12	Excellent
1.16	174	69 × 70	68	11	Good
1.18	160	60 × 60	57	7	Good

* The channel length of L-flow test is 75.5 cm.

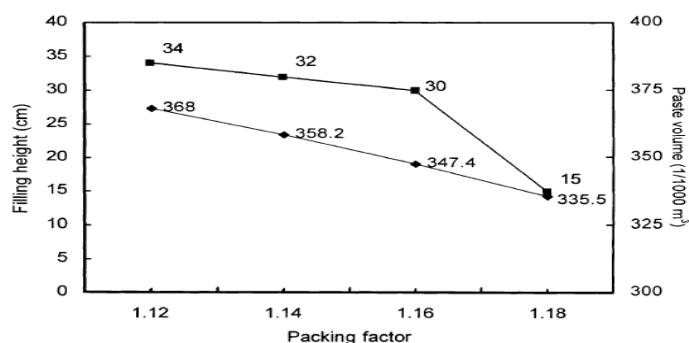
Kad su vrijednosti faktora pakiranja agregata 1.12, 1.14 i 1.16, vrijednosti rasprostiranja slijevanjem su 71x72, 70x71 i 69x70 cm što ukazuje da SCC zadovoljava zahtjeve ranga R1. Kada je vrijednost faktora pakiranja agregata 1.18, rasprostiranje slijevanjem je 60x60 cm koje zadovoljava zahtjeve ranga R2.

Vrijeme protoka V-lijevka u iznosu od 14, 12 i 11 (s) zadovoljava zahtjeve ranga R1. To vrijeme imaju faktori pakiranja 1.12, 1.14 i 1.16. Faktoru pakiranja 1.18, vrijeme protoka u V-lijevku je 7 (s) što zadovoljava zahtjeve ranga R2.

Segregacija se nije pojavila.

Kada je vrijednost faktora pakiranja 1.12, 1.14 i 1.16 duljina protoka L-testa doseže od 68 do 74 cm tako ukazujući na dobru fluidnost SCC-a.

2.4. Utjecaj faktora pakiranja na visinu izdizanja betona kod U testa i volumen paste u SCC-u.

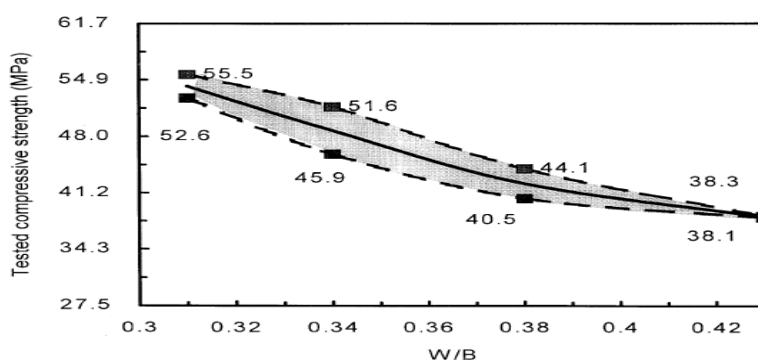


Dijagram 2.2. Utjecaj faktora pakiranja na visinu izdizanja betona kod U testa i volumen paste u SCC-u. [6]

Kod vrijednosti faktora pakiranja agregata od 1.12, 1.14 i 1.16 visina izdizanja betona u drugoj komori kod U testa je od 30 do 34 cm što ispunjava zahtjev $B_h > 30\text{cm}$ da se beton može smatrati samozbijajućim. Visina izdizanja betona je 15 cm kada je vrijednost faktora pakiranja 1.18. Dijagram pokazuje da bi se smanjenjem vrijednosti faktora pakiranja agregata smanjio sadržaj agregata i povećao volumen paste čime se poboljšava mogućnost prolaska kroz armaturu i otpor prema segregaciji. Utvrđeno je da je visina izdizanja betona kod U testa obrnuto proporcionalan vrijednosti faktora pakiranja u izračunu omjera mješavine.

2.5. Odnosi

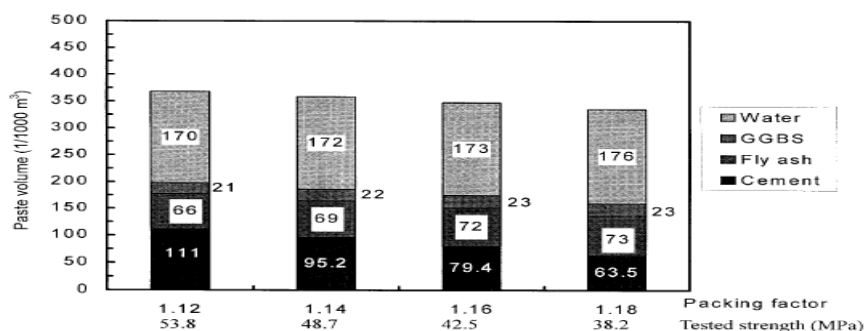
- između tlačne čvrstoće i omjera vode i veziva



Dijagram 2.3. Odnos između tlačne čvrstoće i omjera vode i veziva. [6]

Na tlačnu čvrstoću utječe: sadržaj sitnog i krupnog agregata, omjer materijala, vrijeme njege i omjer vode i veziva. Od svih faktor koji utječu na tlačnu čvrstoću najveći utjecaj ima omjer vode i veziva po težini što se vidi iz prethodnog dijagrama.

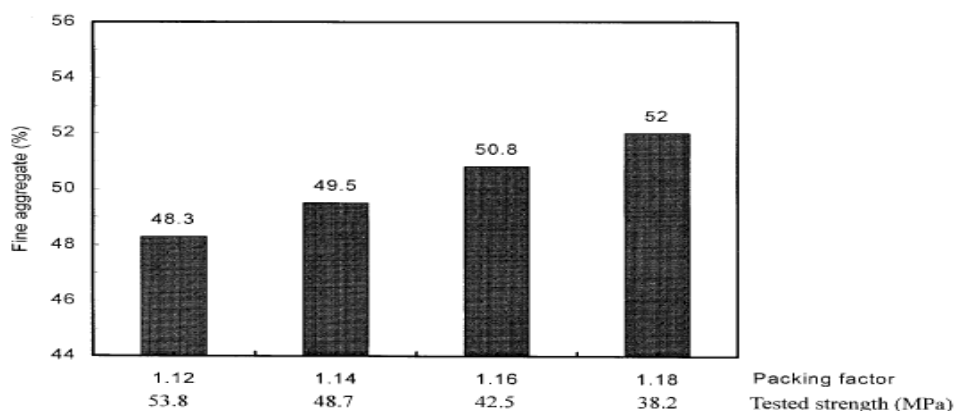
- između volumena paste, tlačne čvrstoće i faktora pakiranja



Dijagram 2.4. Odnos između volumena paste, tlačne čvrstoće i faktora pakiranja. [6]

Dijagram pokazuje da smanjenje faktora pakiranja znači veći volumen paste u SCC-u i veću tlačnu čvrstoću.

- između sitnog agregata u omjeru volumena, tlačne čvrstoće i faktora pakiranja



Dijagram 2.5. Odnos između sitnog agregata u omjeru volumena, tlačne čvrstoće faktora pakiranja. [6]

Dijagram 2.5. prikazuje da omjer sitnog agregata i volumena morta iznosi od 48.3% do 52% što je veće od vrijednosti od 40% predstavljene po Okamuri. Sadržaj sitnog agregata u SCC-u pripremljen u ovoj metodi će biti viši kako bi se zadovoljilo zahtjeve fluidnosti, sposobnosti samozbijanja, otpornosti prema segregaciji kao i srednjoj tlačnoj čvrstoći (27.5-48 MPa) tako utječući na modul elastičnosti SCC-a. Za tlačnu čvrstoću SCC-a je utvrđeno da je obrnuto proporcionalna sadržaju pijeska u mortu. Očito je da ova predložena metoda koristi puno manje veziva. Kod SCC-a tlačne čvrstoće $f_c=34.3$ količina veziva koji je upotrijebljen je samo 470 kg/m^3 dok je cementa 250 kg/m^3 . Rasprostiranje slijeganjem svježeg SCC-a je $69 \times 70 \text{ cm}$ i visina izdizanja betona kod U testa doseže 30 cm .

2.5. Sastav mješavina za SCC po volumenu($0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$)

Table 6
Mix proportion of SCC by volume ($0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$)

Designed strength (MPa)	Coarse aggregates	Fine aggregates	Binders			Water	SP	Total	Packing factor
			Cement	FA	GGBS				
27.5	281	364	63.5	73	23	176	7	987.5	1.18
34.3	276	358	79.4	72	23	173	8	989.4	1.16
41.1	271	351	95.2	69	22	172	8	988.2	1.14
48.0	266	345	111	66	21	170	8	987	1.12

Za predloženu metodu projektiranja mješavina potreban volumen vode u SCC-u je od 0.170 do $0.176 \text{ m}^3/\text{m}^3$ dok je veziva od 0.159 do $0.198 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Volumen vezivne paste ima pozitivan utjecaj na tlačnu čvrstoću SCC-a. Tokom ovog istraživanja maksimalni sadržaj korištenog veziva je 424 kg/m^3 što je manje od 500 kg/m^3 praha koji je predložen od strane Japanske metode projektiranja mješavine. Za dobivanje SCC-a s tlačnom čvrstoćom od 27.5 do 54.9 MPa sadržaj zahtijevanog cementa po predloženoj metodi je samo od 200 do 350 kg/m^3 čime se ostvaruje znatna ušteda na potrebnom cementu. Apsolutni volumen krupnog agregata u SCC-u pripremljenom po predloženoj metodi je samo od 0.266 do $0.281 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Metoda projektiranja mješavine predložene od Okamure predlaže da je sadržaj krupnog agregata oko 50% njene jedinične težine, međutim korištenje ove metode može smanjiti sadržaj potrebnog krupnog agregat na od 706 do 743 kg/m^3 .

2.6. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI

- Vrijednost faktora pakiranja agregata određuje sadržaj agregata i utječe na tlačnu čvrstoću, protočnost i mogućnost samozbijanja.
- Smozbijajući beton projektiran i proizveden predloženom metodom projektiranja mješavine sadrži više pijeska ali manje krupnog agregata, tako mogućnost prolaska prazninama između armature može biti poboljšana.
- U ovoj metodi projektiranja mješavine, volumen pijeska za mort se kreće u rasponu od 54% do 60%.
- Sadržaj vode u SCC-u pripremljenom po predloženoj metodi je oko 170-176 kg/m³ za srednju tlačnu čvrstoću.
- Iznos veziva korištenih u predloženoj metodi može biti manji nego što je potrebno od strane drugih metoda projektiranja mješavina zbog povećanog sadržaja pijeska.
- Ova nova metoda projektiranja mješavina je jednostavnija traži manju količinu veziva i smanjuje troškove.
- PF vrijednost je faktor kontrole za testove visine izdizanja betona kod U-kutije. Svježa svojstva betona s faktorom pakiranja od 1.12 do 1.16 mogu zadovoljiti zahtjeve ranga R1 određenog Japanskom metodom projektiranja mješavina.
- Zbog toga što SCC proizveden ovom metodom sadrži manje krupnog agregata, buduće studije su potrebne za procjenu njihova učinka na modul elastičnosti betona.
- Optimalna vrijednost faktora pakiranja za SCC s drugačijim zahtjevima zahtjeva daljnje istraživanje. [6]

3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

3.1. Uvod

Eksperimentalni dio zadatka je istraživanje koje se temelji na tri različite vrste samozbijajućih betonskih mješavina. U mješavinama upotrijebljen je portland cement s dodatkom zgure, agregat Klis kosa, dodatak letećeg pepela, filer od recikliranog betona i superplastifikator.

Prva mješavina SCC1 sadrži portland cement, agregat, dodatak letećeg pepela, vodu te superplastifikator. Druga mješavina SCC2 sadrži još i silikatnu prašinu, dok treća SCC3 sadrži uz silikatnu prašinu i filer od recikliranog betona.

Provedeno je ispitivanje tečenja, prolaznosti, rasprostiranja, popunjivanja i stopa blokiranja. Tlačna čvrstoća betona ispitana je nakon 7 te nakon 28 dana. Na temelju dobivenih rezultata moći će se zaključiti kako koji od dodataka utječe na svojstva betona.

U nastavku slijedi opis istraživanja, odnosno upotrijebljenih materijala, provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata.

3.2. Materijali

U pripremljanju pokusnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- cement *CEM II/A- S 42,5R*
- Klis kosa agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 i 8 – 16 mm,
- superplastifikator *FTF1*,
- leteći pepeo,
- silikatna prašina,
- drobljeni beton.

3.2.1. Cement

Za pripremu mješavina betona upotrijebljen je portlandski cement CEM II/A- S 42,5R s dodatkom zgure, proizvođač cementa je Cemex, tvornica Sv. Kajo. Potvrda o sukladnosti prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2.

Ovakva vrsta cementa sadrži:

Klinker (K) + gips (G)	85%	80-94
Zgura	11%	6-20
Ostalo	0-4%	0-5

Karakteristike:

- Visoka početna i konačna čvrstoća radi velikog udjela klinkera.
- Smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina, umjeren razvoj topline hidratacije.
- Izvrsna svojstva ugradivosti.
- Svijetla boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima.
- Umjerena otpornost na agresivne medije zahvaljujući dodatku kvalitetne zgure.

Preporuke za primjenu:

- Radovi u cestogradnji cestovne građevine (tuneli, vijadukti, mostovi).
- Izgradnja poslovnih, stambenih i industrijskih objekata.
- Podzemni radovi temeljenja i podloga te stabilizacija tla.
- Izrada gotovih elemenata od betona, armiranog i prednapregnutog betona u normalnoj i termički tretiranoj proizvodnji.
- Transportni, pumpani beton.

- Izrada morta, žbuke i ljepila.
- Individualni radovi.

3.2.2. Agregat

Kamenolom KLIS-KOSA jedan je od najvećih kamenoloma u Splitsko-dalmatinskoj županiji, a nalazi se na zapadnoj padini Mosora. Sama lokacija kamenoloma je vrlo pogodna za eksploataciju tehničkog kamena koja se sastoji od bušačko minerskih radova na već formiranim etažama te utovarom i transportom minirane mase do drobilačkog postrojenja. Postrojenje za drobljenje i separaciju kamena je riješeno da može proizvoditi agregat za sve vrste betona i tampone za cestogradnju.[7]

Tablica 3.1. Granulometrijski sastav agregata. [9]

Frakcija		0-4			4-8			8-16		
Sito		Ostatak	Prolaz	Prolaz	Ostatak	Prolaz	Prolaz	Ostatak	Prolaz	Prolaz
Prolazi	Ostaje	Gr	Gr	%	Gr	Gr	%	Gr	Gr	%
	63									
63	31,5									
31,5	16							244,8	3044,1	100
16	8				34,9	1969,4	100	2212,0	2799,3	92,0
8	4	6,9	899,8	100	1748,5	1934,5	98,2	511,4	587,3	19,3
4	2	156,1	892,9	99,2	178,9	186,0	9,4			
2	1	238,1	736,8	81,9						
1	0,5	186,0	498,7	55,4						
0,5	0,25	122,0	312,7	34,7						
0,25	0,125	75,7	190,7	21,2						
0,125	Tava	115,0	115	12,7	7,1	7,1	0,4	75,9	75,9	2,5
UKUPNO		899,8			1969,4			3044,1		
POČETNA MASA		901,9			1969,5			3044,4		

3.2.3. Dodaci betonu

Superplastifikator FTF - Superplastifikator je dodatak koji omogućuje veliko smanjenje vode određenoj betonskoj mješavini, a da pri tome ne mijenja njezinu obradivost ili koji omogućuje veliko poboljšanje obradivosti, a da se ne mijenja sadržaj vode.

Superplastifikator može istodobno izazvati i oba spomenuta učinka.

Superplastifikator FTF nudi sljedeće prednosti za standardne betone visoke čvrstoće i samozbijajuće betone:

- optimizirana obrada s iznimno niskim vodocementnim faktorom,
- visoko početno tečenje s malim dozama,
- ekstremno visoke rane čvrstoće,
- homogenost svježeg betona.

Tablica 3.2. Osnovna svojstva superplastifikatora FTF1.[10]

oblik	tekućina
boja	narančasta
gustoća (20°C)	$1,07 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
pH vrijednost	3,0 – 5,0
sadržaj klorida	$\leq 0,1 \%$
preporučena doza	0,2 – 1,0 % na ukupnu količinu veziva
maksimalna doza	1,2 % na ukupnu količinu veziva

Leteći pepeo –Leteći pepeo se dobiva kao otpadni proizvod u termoelektranama. Jedna od glavnih prednosti betona s letećim pepelom jest ekološka prihvatljivost radi smanjenja emisije CO₂. Istraživanjima utvrđeno je da je moguće dobiti samozbijajući beton uporabom veće količine letećeg pepela. Pritom dolazi do smanjivanja tlačne čvrstoće, a svojstva trajnosti i obradivost se uglavnom poboljšavaju. [8]

Tablica 3.3. Karakteristike korištenog letećeg pepela.[11]

	Postav na:	8±2%	x	x
Datum:	Sat.	Ostatak na 0,045mm	Blain	G.Ž
5/2/10	21,35	5,8	5118	3,7

Silikatna prašina - Silikatna prašina je mineralni dodatak betonu koji aktivno sudjeluje u hidrataciji cementa te predstavlja jedan od najkvalitetnijih pucolana. Na svojstva betona djeluje preko pucolanskih reakcija kojima se povećava količina C-S-H, te pomoću sitnih čestica koje doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti i zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa.

U izradi pokusnih mješavina upotrijebljena je *Meyco MS 610*, posebna visoko kvalitetna mikrosilika, koja je kao dodatak izrazito kvalitetnim betonima odobrena prema ASTM propisu. Ona u potpunosti mijenja poroznu strukturu betona te čini strukturu gušćom i otpornijom na bilo kakave vanjske utjecaje. Mikrosilika Meyco MS 610 koristi se za proizvodnju dugotrajnih, izdržljivih betona, odnosno betona visoke čvrstoće, pumpanih betona, lijevanih betona, podvodnih betona, betona s malim sadržajem cementa itd.

Meyco MS 610 mora se upotrijebiti u kombinaciji s plastifikatorom ili superplastifikatorom. Dodaje se betonu tijekom doziranja i to u količini 5 – 15% od mase cementa, a minimalno vrijeme miješanja je 90 sekundi.

Meyco MS 610 ima razna djelovanja, a to su:

- povećava čvrstoću,
- poboljšava otpornost na kemijske i mehaničke štetne utjecaje,
- sprječava segregaciju svježeg betona,
- smanjuje količinu ubrzivača.

Osnovni tehnički podaci o silikatnoj prašini Meyco MS 610 prikazani su u tablici 3.4.

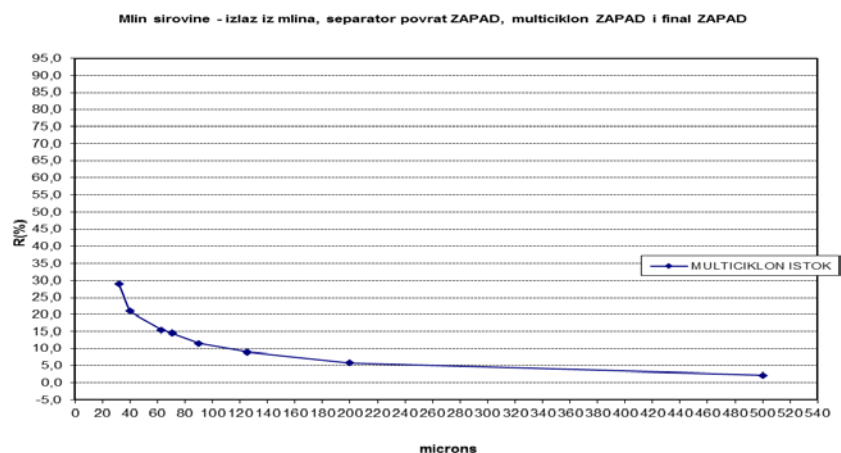
Tablica 3.4. Osnovna svojstva Meyco MS 610 mikrosilike.[12]

Tehnički podaci	
Oblik	Prah
Boja	Siva
Gustoća	0,55 - 0,70 kg/l
Udio klorida	< 0,1 %

Drobljeni agregat:

Tablica 3.5. Osnovna svojstva drobljenog agregata.[13]

SIEVES	REST	Grain size	MULTICIKLON ISTOK	sives	passing
	MULTICIKLON ISTOK	microns	%		SEPARATOR (west+ 50% east) reject
Blaine		less than 32 mic.	71,0	microns	%
microns	%	32-40 mic.	8,00	32	71,00
32	29,0	40-63 mic.	5,60	40	79,00
40	21,0	63-71mic.	0,80	63	84,60
63	15,4	71-90 mic.	3,00	71	85,40
71	14,6	90-125mic.	2,60	90	88,40
90	11,6	125-200mic.	3,20	125	91,00
125	9,0	200-500 mic	3,60	200	94,20
200	5,8			500	97,8
500	2,2				



Dijagram 3.1. Drobljeni agregat.[13]

3.3. Proračun sastava betona

Izrađene su tri mješavine betona, a recepture su prikazane u tablici 3.5. Receptura za SCC1 izračunata je prema metodi jednostavnog projektiranja koje je opisana u poglavlju 2 [6], a za SCC2 i SCC3 se samo sva količina letećeg pepela iz SCC1 zamijenila sa dodatkom silikatne prašine (2:1 u SCC2) i filera od recikliranog betona (1:1:1 u SCC3). Potrebna količina vode je još dodavana pri vizualnoj procjeni obradivosti betona.

Tablica 3.5. Sastav mješavina za $1m^3$

Komponente mješavine (kg)		SCC1	SCC2	SCC3
Cement		350	350	350
Voda		190.12	190.12	214.46
V/C		0.43	0.43	0.43
Superplastifikator		5,85	5,85	5,85
Leteći pepeo		137.32	96.12	45.76
Silikatna prašina			41.20	45.76
Filer(reciklirani beton)				45.76
Agregat	0-4 mm	938	938	938
	4-8 mm	240.24	240.24	240.24
	8-16 mm	512.52	512.52	512.52

Tablica 3.6. Sastav mješavina za jedno laboratorijsko miješanje

Sastav (kg)	SCC1	SCC2	SCC3
Cement	8,75	8,75	8,75
Voda	5,671	4,753	6,084
Silikatna prašina	0	1,0299	1,144
Leteći pepeo	3,433	2,4031	1,144
Superplastifikator	0,146	0,146	0,146
Klis-kosa: 0-4	23,45	23,45	23,45
4-8	6,006	6,006	6,006
8-16	12,813	12,813	12,813
Filer - reciklirani beton	0	0	1,144

Potrebne količine komponenta, koji čine sastav betona, za sve mješavine izmjerene su na preciznoj vagi.

**Slika 3.1.** Mješalica betona i mješavina [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

3.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama

Ispitivanja su provedena na tri mješavine u laboratoriju, a metode ispitivanja su niže navedene.

3.4.1. V-lijevak (V-funnel)

V-funnel test se koristi za određivanje viskoznosti i svojstava popunjavanja samozbijajućeg betona. V- funnel se popuni svježim betonom te se mjeri vrijeme za potpuno istjecanje betona iz lijevka, slika 3.2..



Slika 3.2. V- lijevak test (V- funnel) [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

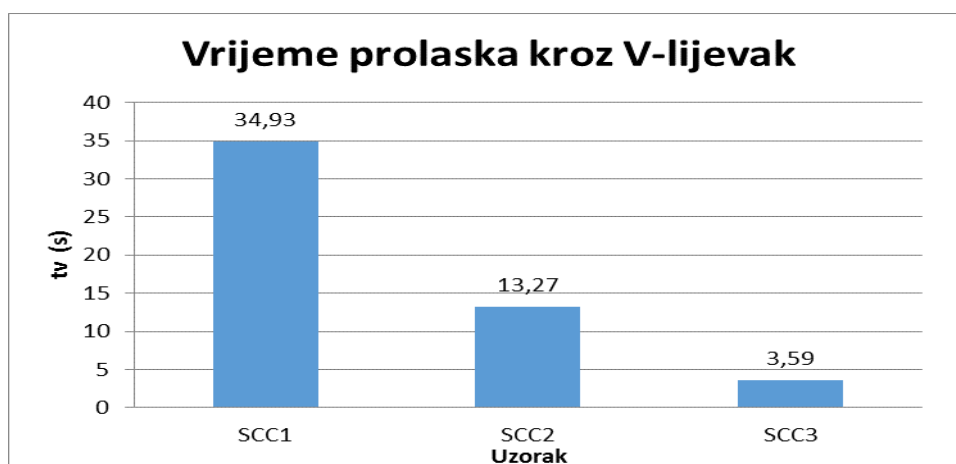
Postupak ispitivanja

Potrebno je očistiti lijevak te navlažiti sve unutarnje površine. Lijevak treba postaviti vertikalno sa horizontalnim gornjim otvorom. Vrata se zatvore te se postavi posuda za primanje uzorka betona prilikom njegovog istjecanja. Lijevak se napuni betonom te se poravna njegova gornja površina. Nakon počka od (10 ± 2) sekunde vrata se naglo otvore te se istodobno uključi štoperica. Beton istječe iz lijevka te se štoperica zaustavlja čim se ugleda otvor vertikalno kroz lijevak.

Izmjereno vrijeme se definira kao vrijeme istjecanja betona i izražava se u sekundama. Indeks viskoznosti dobije se kao $R_c = 10/t$, gdje je t vrijeme istjecanja uzorka. Za manje vrijednosti R_c viskoznost uzorka je veća i obratno.

Rezultati ispitivanja:

Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak, t_v (s)	Viskoznost	Razred
SCC1	34,93	0,286	
SCC2	13,27	0,754	VF2
SCC3	3,59	2,785	VF1



Dijagram 3.2. Vrijeme prolaska kroz V-lijevak.

Mješavina SCC1 bez silikatne prašine i recikliranog betona nije zadovoljila uvjete koje je postavilo Europsko udruženje EFNARC. Vrijeme prolaska od 34,93 (s) i izrazito niska viskoznost ovu mješavinu nisu svrstali u razred. Zbog nestabilnosti mješavine SCC1, na otvoru V lijevka nastane čep koji usporava istjecanje mješavine.

Mješavina SCC2 sa silikatnom prašinom je svrstana u VF2, a najbolje rezultate postigla je zadnja mješavina sa kombinacijom dodataka silikatne prašine i filera od recikliranog betona, te je tako svrstana u VF1.

3.4.2. Metoda razastiranja (Slump-flow)

Metoda razastiranja se koristi kod određivanja tečenja i samozbijanja betona, odnosno njegove deformabilnosti. Mjere se dva parametra: veličina rasprostiranja i vrijeme rasprostiranja (za T50). Test nije prikladan za zrna agregata veća od 40 mm.



Slika 3.3. Način ispitivanja [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Postupak ispitivanja

Ploča se postavi na ravnu i stabilnu površinu i navlaži se spužvom ili krpom. Također se navlaže unutarnje površine stošca te se postavi u centar ploče. Stožac se popuni svježim betonom bez ikakvog nabijanja i vibriranja te se poravna gornja površina betona. Nakon počeka od otprilike 30 sekunda, stožac se podigne vertikalno na način da beton isteče u svim smjerovima.

Mjerenje vremena širenja počinje u trenutku kad stožac otpusti beton. Štoperica se zaustavi čim beton dosegne krug promjera 500 mm.

Izmjereno vrijeme T50 se izražava u sekundama.

Test je završen kad se beton prestane širiti. Izmjeri se najveći promjer razasutog betona d_{max} te promjer okomit na njega d_{perp} .



Slika 3.4. Mjerenje promjera razastiranja SCC1, SCC2, SCC3 [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Rezultati ispitivanja

Promjer rasprostiranja S definira se kao srednja vrijednost dva izmjerena promjera d_{max} i d_{perp} .

LB1- $d_{max}= 700$ mm, $d_{perp}= 700$ mm, $S= 700$ mm

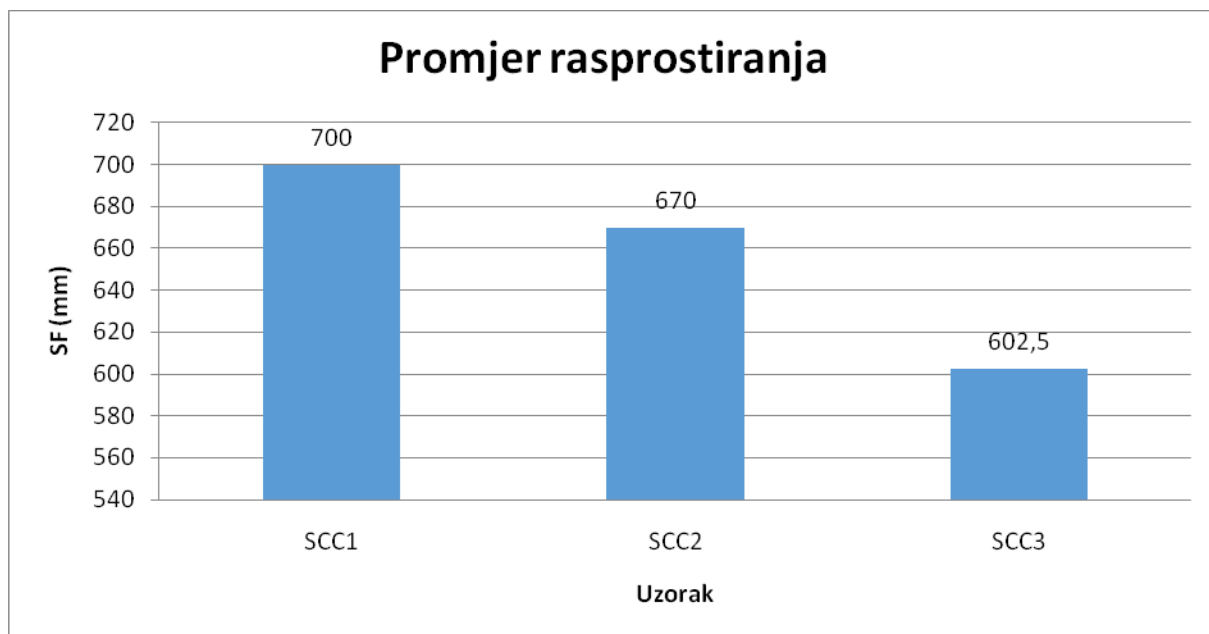
$T_{50}= 2,07$ s

LB2- $d_{max}= 680$ mm, $d_{perp}= 660$ mm, $S= 670$ mm

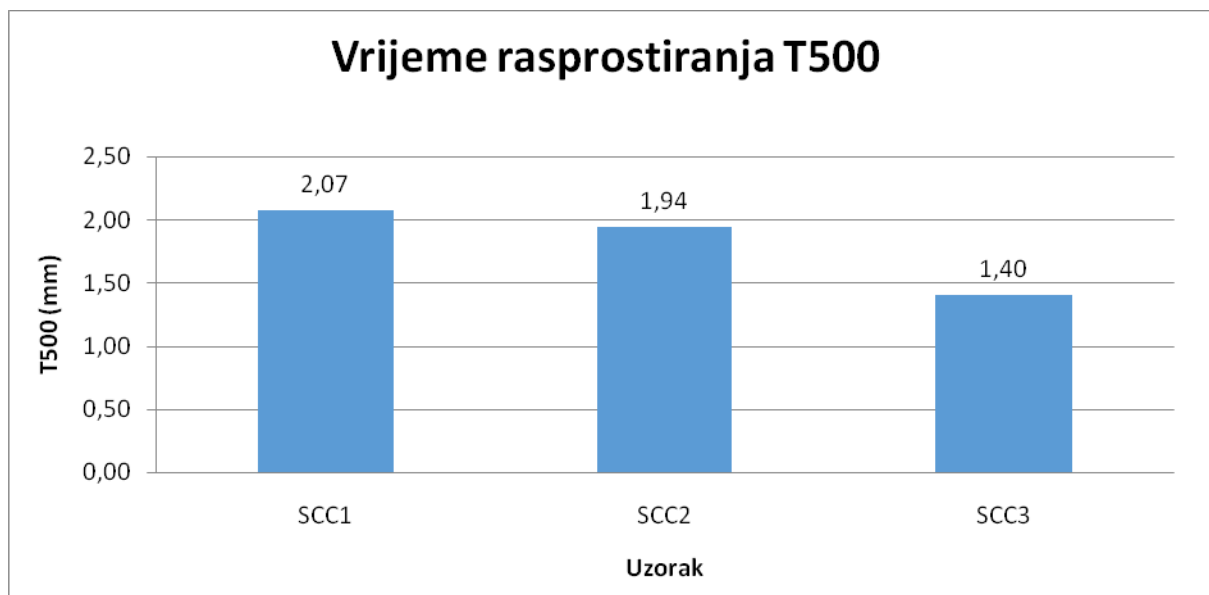
$T_{50}= 1,94$ s

LB3- $d_{max}= 605$ mm, $d_{perp}= 600$ mm, $S= 602,5$ mm

$T_{50}= 1,40$ s



Dijagram 3.3 Promjer rasprostiranja za tri mješavine.



Dijagram 3.4. Rezultati vremena rasprostiranja.

Prema EFNARC- u, mješavina SCC1 samo sa letećim pepelom pripada razredima SF2 i VS2, mješavina SCC2 s dodatkom silikatne prašine razredima SF2 i VS1, a mješavina SCC3 koja uz leteći pepeo sadrži još silikatnu prašinu i filer od recikliranog betona razredima SF1 i VS1.

Iz priloženih slika vidljivo je da mješavina SCC1, napravljena samo sa letećim pepelom, prema predloženom načinu proračuna ima previše vode koja se izlučuje na krajevima ispitnog uzorka i čini beton nestabilnim.



Slika 3.5. Promatranje segregacija kod mješavina SCC1, SCC2, SCC3 [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

3.4.3. L-box test

L-box aparaturom ispituje se sposobnost prolaska betona kroz uske prostore između šipki armature. Sposobnost prolaska definira se visinom i duljinom koju beton zauzme prilikom tečenja.

Postoje dva tipa L-box uređaja ovisno o preprekama, jedan sa 3 glatke šipke i drugi sa 2 glatke šipke profila Ø12 mm. Šipke su na međusobnom razmaku 41 mm, odnosno 59 mm.



Slika 3.6. L- box uređaj [slika zabilježena tijekom ispitivanja].



Slika 3.7. Stopa blokiranja kod SCC1, SCC2 i SCC3.

Postupak ispitivanja

L-box uređaj se postavi na ravnu horizontalnu podlogu. Vertikalni dio uređaja se popuni svježim betonom. Nakon 60 sekunda klizna vrata se podignu te se pričekava dok se beton ne zaustavi prilikom tečenja iz vertikalnog dijela u horizontalni.

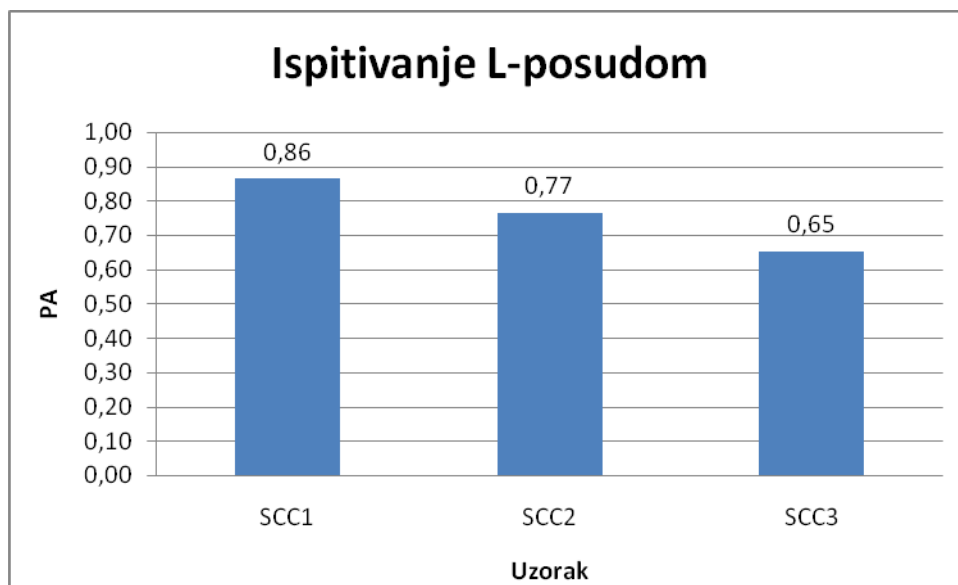
Izmjeri se visinska razlika na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela uređaja na 3 mjesta, dva na krajevima i jedan u sredini, te se izračuna njihova prosječna vrijednost Δh .

Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3.6..

Tablica 3.6. Rezultati ispitivanja L- posudom.

Oznaka uzorka	ΔH_{11} [mm]	ΔH_{12} [mm]	ΔH_{13} [mm]	ΔH_{1sr} [mm]	ΔH_{21} [mm]	ΔH_{22} [mm]
SCC1	495	490	485	490,0	55	55
SCC2	500	490	490	493,3	70	70
SCC3	480	480	480	480,0	70	70
	ΔH_{23} [mm]	ΔH_{2sr} [mm]	$H_1=600-\Delta H_{1sr}$ [mm]	$H_2=150-\Delta H_{2sr}$ [mm]	$PA=H_2/H_1$	Razred
	55	55,0	110,0	95,0	0,86	PL2
	65	68,3	106,7	81,7	0,77	-
	75	71,7	120,0	78,3	0,65	-



Dijagram 3.5. Rezultati dobiveni ispitivanjem L-posudom

Kako bi se postigla dovoljno dobra sposobnost zaobilaženja prepreka, potrebno je da beton ima dovoljno paste i da mu se osigura viskoznost.

U skladu s EFNARC standardima, mješavina bez siliktne prašine i filera od recikliranog betona spada u klasu PL2, međutim potrebno je napomenuti da je mješavina u prijašnjim testiranjima imala veliku sklonost segregaciji. Na priloženim slikama jasno je vidljivo da smjesa nije stabilna.

3.4.2. J-ring

Ovim se testom istražuje svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona. Može se koristiti i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji usporedbom dva uzorka. Mogu se dobiti tri parametra: razastiranje, vrijeme razastiranja $T50_J$ (neobavezno) i stopa blokiranja. Razastiranje kod J-prstena odnosi se na deformaciju betona dok potrebno vrijeme razastiranja se odnosi na brzinu deformacije.

Postupak ispitivanja

Postaviti ploču na ravnu podlogu. Napuniti posudu sa 6-7 litara samozbijajućeg betona te ostaviti da miruje otprilike 1 minutu, a za to vrijeme blago navlažiti unutarnje površine stošca i ploču, te postaviti konus u centar kruga od 200 mm. Postaviti J-prsten oko stošca. Napuniti stožac uzorkom iz kante te očistiti beton koji se pao na ploču prilikom punjenja. Nakon otprilike 30 sekunda podignuti stožac i uključiti štopericu. Zaustaviti štopericu kad beton dosegne krug od 500 mm. Izmjereno vrijeme označava se s $T50_J$. Postaviti šipku sa ravnom stranom na J-prsten te izmjeriti relativnu visinsku razliku između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0 i četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima.



Slika 3.8. Postupak ispitivanja J-prstenom [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Rezultati

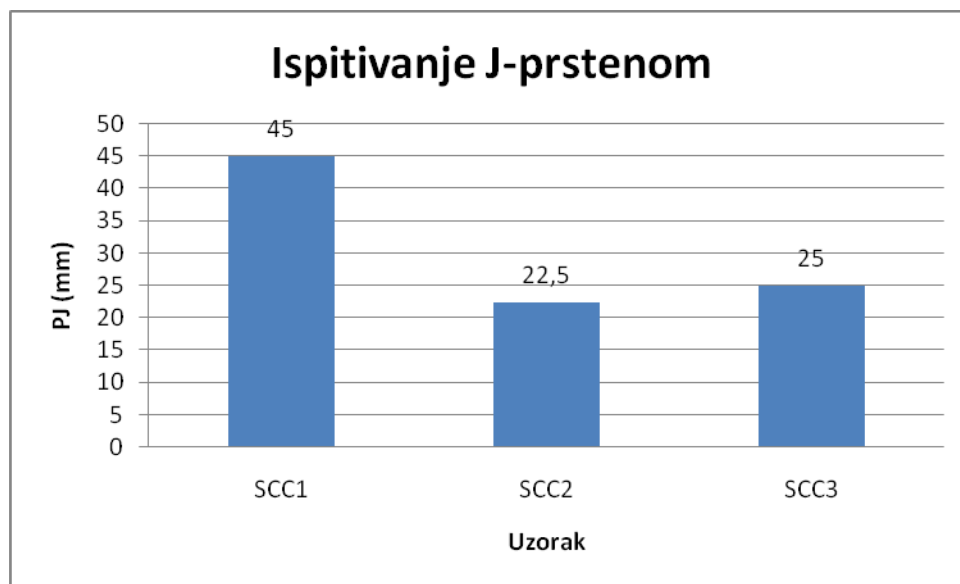
Razastiranje J-prstena S_J je srednja vrijednost promjera d_{max} i d_{perp}

Tablica 3.7. Rezultati za SCC1, SCC2 i SCC3.

Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	SF [mm]	T_{500} [s]	Δh_0 [mm]	Δh_{x1} [mm]	Δh_{x2} [mm]	Δh_{y1} [mm]	Δh_{y2} [mm]	PJ	Razred
SCC1	650	660	655	2,31	80	125	130	125	120	45	-
SCC2	640	615	627,5	2,28	100	123	122	122	123	22,5	-
SCC3	530	540	535	1,81	95	120	120	120	120	25	-

Rezultati dobiveni metodom J-prstena pokazuju da nijedna mješavina ne zadovoljava uvjete propisane od EFNARC-a.

J - ring	PJ1	≤ 10 (12 rebara)
	PJ2	≤ 10 (16 rebara)



Dijagram 3.6. Rezultati dobiveni ispitivanjem J-prstenom.



Slika 3.9. Primjeri testiranja J-prstenom (SCC1, SCC2, SCC3) [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

3.4.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Nakon završetka prethodnih ispitivanja, beton je ugrađen u kalupe kako bi se dobili uzorci kocaka dimenzija 15x15x15 cm. Uzorci stoje u kalupima 24 sata i to u kontroliranim uvjetima, odnosno pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na temperaturi $20 \pm ^\circ\text{C}$. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja.



Slika 3.10. Uzorci svježeg betona [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Na dan ispitivanja se obrišu tako da im površina bude suha i zatim se važu. Nakon toga su spremni za ispitivanje. Tlačna čvrstoća je ispitana na zasićenim, površinski suhim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona, prema propisima. Uzorak se stavi u prešu i opterećuje do sloma, a zatim se očitava naprezanje i sila u uzorku u trenutku sloma. Ispitivanje je provedeno nakon 7 i 28 dana.



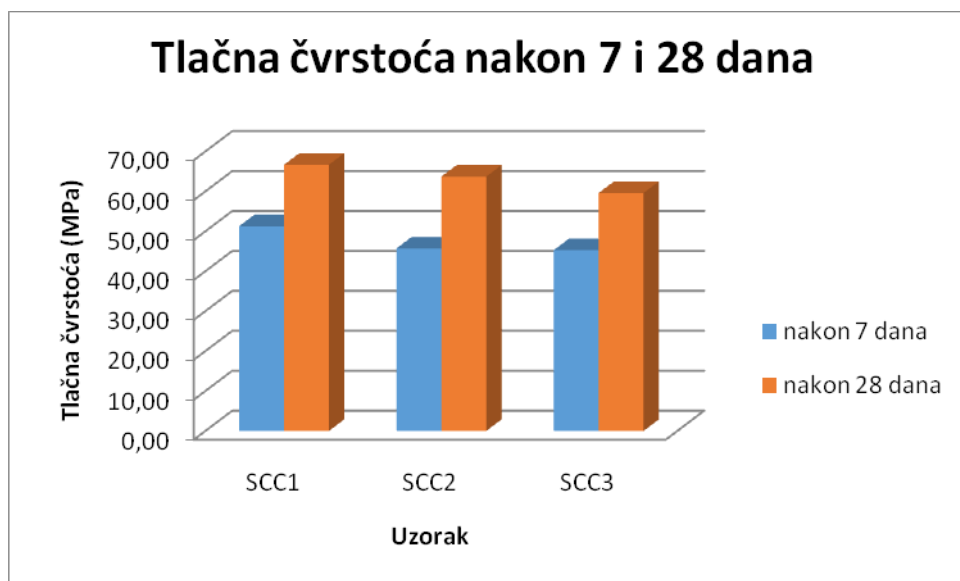
Slika 3.11. Ispitivanje tlačne čvrstoće [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Za svako ispitivanje su napravljene po 3 kocke. Kvaliteta uzoraka varira, pa se prilikom obrade rezultata kao mjerodavna vrijednost uzima srednja vrijednost od 3 uzorka.

Rezultati ispitivanja

Tablica 4.10. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i sile pri lomu.

Oznaka uzorka	Starost od 7 dana		Starost od 28 dana	
	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]
SCC1	8130,57	51,27	8180,67	66,67
SCC2	7923,13	45,70	7857,50	63,70
SCC3	7885,17	45,27	7879,53	59,60



Dijagram 3.6. Tlačne čvrstoće betona nakon 7 i 28 dana.

Najveću tlačnu čvrstoću postigla je mješavina SCC1 s rezultatom od 51,27 MPa nakon 7 dana te 66,67 MPa nakon 28 dana. Mješavine koje su se radile s dodacima silikatne prašine te kombinacijom silikatne prašine i filera od recikliranog betona imale su relativno iste čvrstoće nakon 7 dana, dok je nakon 28 dana bolje rezultate imala mješavina bez filera od recikliranog betona u iznosu od 63,70.

Iako prva mješavina u svježem stanju nije bila stabilna, u očvrslom stanju je pokazala najbolje rezultate.

3.4.4. Ispitivanje ultrazvukom

Određivanje brzine longitudinalnog ultrazvučnog impulsa je provedeno prema odgovarajućoj normi. Uređaj za određivanje brzine ultrazvučnog impulsa se sastoji od generatora, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač. U ovom radu, mjerenje je provedeno na laboratorijskim uzorcima oblika kocke, brida 15 cm.



Slika 3.12. Ispitivanje ultrazvukom [slika zabilježena tijekom ispitivanja].

Rezultati ispitivanja

Mjereno je vrijeme širenja ultrazvuka kroz betonske uzorke u tri točke. Kao rezultat se navodi srednja vrijednost svih dobivenih vrijednosti.

Rezultati nakon 7 dana:

LB1 - $t = 31,1 \mu\text{s}$, $v = 4823,2 \text{ m/s}$, $\rho = 2398,4 \text{ kg/m}^3$

LB2 - $t = 32,3 \mu\text{s}$, $v = 4637,6 \text{ m/s}$, $\rho = 2332,4 \text{ kg/m}^3$

LB3- $t = 32,9 \mu\text{s}$, $v = 4560,8 \text{ m/s}$, $\rho = 2305,6 \text{ kg/m}^3$

Rezultati nakon 28 dana:

LB1 - $t = 31,6 \mu s$, $v = 4753,5 \text{ m/s}$, $\rho = 2407,8 \text{ kg/m}^3$

LB2 - $t = 32,5 \mu s$, $v = 4609,1 \text{ m/s}$, $\rho = 2312,7 \text{ kg/m}^3$

LB3- $t = 31,8 \mu s$, $v = 4713,7 \text{ m/s}$, $\rho = 2309,1 \text{ kg/m}$

Dinamički modul elastičnosti izračunava se kao:

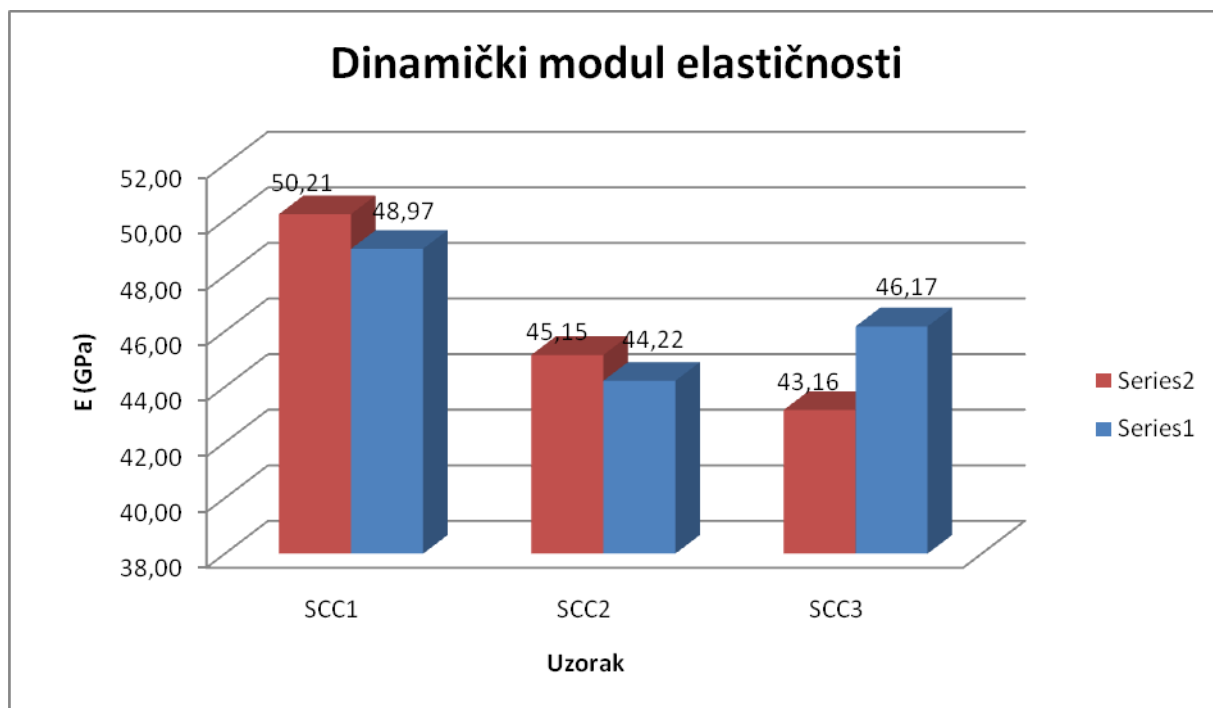
$$E_{\text{din}} = v^2 \times \left[\frac{(1+\nu) \times (1-\nu)}{(1-\nu)} \right]$$

Tablica 4.10. Rezultati dobiveni ispitivanjem ultrazvukom.

Brzina ultrazvučnog vala (m/s)		SCC1	SCC2	SCC3
	nakon 7 dana	4823,2	4637,6	4560,8
	nakon 28 dana	4753,5	4609,1	4713,7

Gustoća betona u očvrslom stanju (kg/m ³)		SCC1	SCC2	SCC3
	nakon 7 dana	2398,4	2332,4	2305,6
	nakon 28 dana	2407,8	2312,7	2309,1

Dinamički modul elastičnosti (Gpa)		SCC1	SCC2	SCC3
	nakon 7 dana	50,21	45,15	43,16
	nakon 28 dana	48,97	44,22	46,17



Dijagram 3.7. Dinamički modul elastičnosti.

Prema dijagramu 3.7. najveći dinamički modul ima mješavina SCC1 (samo leteći pepeo) i to nakon 7 dana. Uspoređujući rezultate dinamičkog modula i čvrstoće, jasno je da nemaju istu zakonitost kao i tlačna čvrstoća. Dinamički modul elastičnosti mjeri se na tri mjesta, a bilo kakvi defekti u uzorku utječu na rezultate ispitivanja. Time se donekle može objasniti odstupanje u rezultatima ispitivanja.

ZAKLJUČAK

Samozbijajući beton predstavlja izrazito veliki napredak u tehnologiji betonske industrije. Naime, njegovo korištenje omogućuje veću učinkovitost i znatno kraće vrijeme ugradbe. U radu su istraženi utjecaji dodataka kao što su leteći pepeo, silikatna prašina te drobljeni agregat na svojstva samozbijajućeg betona. Opisan je njegov razvoj, svojstva koja ima svježem i očvrslom stanju i metode kojima se ispituju svojstva.

Provedena su laboratorijska ispitivanja na 3 različita sastava betona. Svaka mješavina je imala drugačiju vrstu i količinu mineralnih dodataka. U mješavinama je upotrebljen portland cement, superplastifikator i agregat frakcija 0-4, 4-8 i 8-16. Prva mješavina napravljena je s dodatkom letećeg pepela, druga sa letećim pepelom i silikatnom prašinom, dok je treća napravljen s dodatkom letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona.

Rezultati ranih čvrstoće betona (nakon 7 dana), kao i nakon 28 dana pokazali su da najveću čvrstoću ima prva mješavina. To znači da je najveću čvrstoću postigao beton s dodatkom letećeg pepela bez silikatne prašine i filera od recikliranog betona. Druge dvije mješavine imaju približno jednake rezultate.

Eksperimentalne metode pokazale su da prva mješavina s dodatkom isključivo letećeg pepela ima izrazito malu viskoznost te veliko izlučivanje vode na rubovima što ukazuje na nestabilnost mješavine. Njeno vrijeme istjecanja nije zadovoljilo propisane uvjete, dok je vrijeme protjecanja treće mješavine koja je u svom sastavu imala sva tri dodatka bilo najviše zadovoljavajuće. Mješavina SCC1 bez silikatne prašine i filera od recikliranog betona jedina je zadovoljila uvjete proska kroz prepreke i svrstana je u klasu PL2 u skladu s EFNARC standardima, međutim mješavina nije bila stabilna. Rezultati dobiveni metodom J-ringa pokazali su da nijedna mješavina ne zadovoljava propisne uvjete. Prikazana metoda proračuna sastava betona pokazala je da je predviđena količina vode za leteći pepeo prevelika, te je treba reducirati. Stoga bi trebalo za leteće pepele, koji se koriste na našem području, odrediti tu optimalnu količinu.

Raspolažući sa svim informacijama prikupljenim prilikom eksperimentalnih radova i raznih literatura, u budućim istraživanjima potrebno je detaljnije ispitati svojstva i ponašanje samozbijajućeg betona, kao i odabrati odgovarajuću metodu projektiranja sastava.

POPIS LITERATURE

- [1] DIPLOMSKI RAD: Hrvoje Kvež, Samozbijajući beton 2006.
- [2] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use, May 2005.
- [3] Ouchi, M.: Self-compacting concrete – development, applications and investigations, Proceedings of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, str. 29-34, Reykjavik, 1999.)
- [4] Štirmer, N.; Banjad Pečur, I.: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61, str. 321-329, Zagreb, 2009.
- [5] Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton; Predavanja iz Građevinskih materijala 2, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.
- [6] Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai: A simple mix design method for self-compacting concrete; Cement and Concrete Research 31 (2001) 1799–1807.
- [7] <http://www.lavcevic.hr/pomgrad.php>
- [8] Skazlić, M., Rosković, R., Banjad Pečur, I.: Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela, Građevinar 60 (2008) 11, 945-952.
- [9] Tehnički list za agregat
- [10] Tehnički list za Readyplast FTF1
- [11] Tehnički opis za leteći pepeo
- [12] Tehnički opis za Meyco MS 610
- [13] Tehnički opis za drobljeni agregat